

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800248

研究課題名(和文)北極海カナダ海盆域の亜表層水温極大と海水変動に関するモデリング研究

研究課題名(英文) Modeling study on subsurface temperature maxima and sea ice variability in the Canada Basin, Arctic Ocean

研究代表者

渡邊 英嗣 (WATANABE, Eiji)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・北極環境変動総合研究センター・研究員

研究者番号：50722550

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：北極海全域を対象とした水平解像度5kmの海水海洋結合モデルで2001年から2014年までの年々変動実験を行い、数地点の係留系観測で得られた物理データも合わせて、カナダ海盆南部における冬季海水下の亜表層暖水輸送プロセスについて解析を行った。本課題によって、チャクチ海台周辺域における亜表層の昇温シグナルは、バロー峡谷からの熱流入、チャクチ陸棚縁に沿った西向きジェット、海水融解水による成層強化の組み合わせによって大きく年々変動していることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：The pan-Arctic high-resolution sea ice-ocean modeling studies were conducted to examine subsurface warm water transport under sea ice in the southern Canada Basin. The interannual experiment for 2001-2014 reproduced mid-winter or spring warming signals which were observed by subsurface hydrographic sensors in the Chukchi Borderland. The modeling analyses indicated that the Barrow Canyon throughflow and the westward jet along the Chukchi shelf break reasonably accounted for lateral ocean heat transport and consequent subsurface warming in the downstream regions. It was also suggested that highly stratified condition due to anomalous sea ice meltwater assisted the winter heat transport.

研究分野：極域海洋学

キーワード：北極海 高解像度海水海洋結合モデル 亜表層水温極大 陸棚縁ジェット

1. 研究開始当初の背景

北極海で近年顕著な海水減少は大気や生態系の応答も含めて重大トピックとなっており、早急にメカニズムを解明し、将来予測に反映させることが各方面から要請されている。海水減少の要因としては、風系の変化や海上気温の上昇が指摘されているが、海域によっては海洋熱輸送の影響も重要である。

北極海の太平洋側に位置するカナダ海盆では、亜表層に複数の水温極大層が観測されている。このうち水深 50–100m の水温極大はベーリング海からチャクチ陸棚にかけて北上しながら夏季に太陽放射加熱を受けた暖水塊（太平洋夏季水）がバロー峡谷沖合で発生した中規模渦やポーフォート海洋循環などによって水平方向に貫入することで形成されると考えられている。このように輸送された海洋熱は数ヵ月から数年以上のタイムスケールで残存するが、何らかの物理プロセスによって海面付近に供給された場合には、直上の海水を底面から融かす、あるいは新たな結氷を抑制することにつながり、海水減少要因の一端を担う可能性がある。

2. 研究の目的

太平洋側北極海の亜表層において水平熱輸送の量および経路が十年スケールで変化していることが米国ウッズホール海洋研究所の長期時系列観測などによって示唆されているが [引用文献]、その根拠となる物理データは夏から秋に限定された船舶観測および数地点の係留系観測でしか取得されておらず、海盆域の亜表層に至る正確な熱輸送経路はまだ十分にわかっていない。

一連のプロセスを定量的に解析するには、数値モデリングが有用な手段となるが、これまで世界各国で開発されてきた北極海モデルの殆どは水平解像度が数十 km と粗いため、沿岸流・渦活動・湧昇などの局所的な物理現象の表現が不十分であった。

そこで本課題では、現実的な設定の下で北極海全域を対象とした高解像度海水海洋結合モデリングを実施し、ベーリング海峡からチャクチ陸棚を経由してカナダ海盆周辺域に至るまでの太平洋夏季水に関わる海洋熱輸送プロセスをより詳細に明らかにすることを目的とした研究を行う。

3. 研究の方法

本課題で使用する海水海洋結合モデルは東京大学大気海洋研究所と海洋研究開発機構で共同開発している COCO (Center for Climate System Research Ocean Component Model) version 4.9 [引用文献] で、北極海全域を対象に水平 5 km 格子 (1280 × 1024) / 鉛直 42 層の渦解像版を海洋研究開発機構の地球シミュレータにて

実装した (図 1)。初期の海水海洋場は水平 25 km 格子の中解像度版で 1979 年から数十年積分した出力を与えた。大気境界条件は NCEP-CFSR 再解析データから作成し、AOMIP の河川流量データを海面淡水フラックスとして与えた。ベーリング海峡では観測に基づく流量・水温・塩分の太平洋起源水を流入させ、輸送経路を可視化するために仮想トレーサーも撒いた。初年度にあたる平成 26 年度は、特定の年の数ヵ月から 1 年間を対象とした季節変動実験を行い、平成 27 年度以降は計算期間を 2001 年から 2014 年までの 14 年間に拡張した。

得られたモデル結果は海洋研究開発機構や北海道大学低温科学研究所がバロー峡谷およびチャクチ深海平原において継続的に実施している係留系観測からのデータとも比較検証しながら、主に海洋熱輸送プロセスに着目した解析を行った。

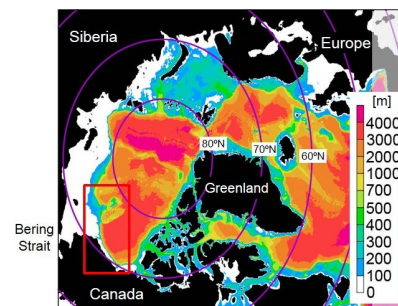


図 1 モデル計算領域における海底深度 [m]。本課題の主たる解析対象海域を赤い矩形で示す。紫のコンターは等緯度線 [°N]。

4. 研究成果

(1) 風系変化に対する海洋表層循環の応答

冬季の風系が異なる 2 つの年の大気境界条件をそれぞれ与える季節変動実験の結果を解析した (図 2) [雑誌論文]。2010 年秋季から 2011 年春季にかけては、ポーフォート高気圧に伴って、カナダ海盆南部において強い東風による鉛直乱流混合およびチャクチ陸棚側からのエクマン表層流が卓越することが示された。このような状況下では、夏季の渦活動によってカナダ海盆の亜表層に流入した陸棚起源の海洋熱がかなり早い段階で大気に放出される。

一方、翌年の 2011 年秋季から 2012 年春季にかけては、シベリア大陸上から北極海中央部にかけて高気圧が張り出す気圧パターンになっており、カナダ海盆では北西風が卓越していた。この風に伴って海盆中央部からチャクチ陸棚北西部に向かうエクマン表層流が生じ、低塩分な海盆水が拡がることで密度成層が強化された。このような状況下では、カナダ海盆の亜表層に蓄えられた海洋熱が比較的長い時間保持されることになり、直上の海水に対する影響のタイムスケールは数ヵ月から数年以上となることが示唆された。

一般にこのような冬季海水下の海洋循環変動を船舶および係留系の観測データだけで面的に捉えることは困難であるが、近年では CryoSat-2 に搭載された海面高度センサー SAR/SIRAL (Synthetic Aperture Radar / Interferometric Radar Altimeter) を利用することで、北極海全域の地衡流に関する情報を得ることができるようになった。本課題の季節変動実験で計算された海洋循環場もこの衛星プロダクトと整合的であることを確認した [雑誌論文]。

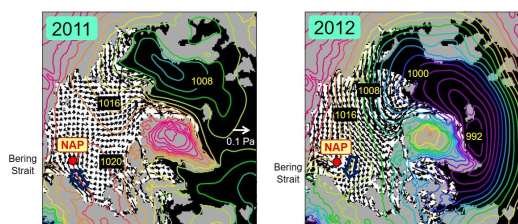


図2 冬季平均した(コンター)海面気圧 [hPa] と(ベクトル)海水流速場。(左) 2010/11年、(右) 2011/12年。ノースウィンド深海平原(NAP)の係留系からは两年で陸棚起源物質量が大きく異なることも示されている。

(2) バロー沿岸ポリニヤ特性

本課題では、アラスカ沖のバロー沿岸ポリニヤ BCP (Barrow Coastal Polynya) の形成プロセスにも着目した [雑誌論文]。ポリニヤとは海水域における持続的な開水面あるいは薄氷域のことであり、潜熱ポリニヤと顕熱ポリニヤに大別される。前者は風や海流に駆動される海水の力学的移動によって、後者は比較的温暖な水塊からの熱供給によって形成・維持される。BCP はこれまで強い北東風に伴って海水が岸から離れることで形成される潜熱ポリニヤとして考えられてきたが、人工衛星アルゴリズムの改良や最新の係留系観測によって、温暖な太平洋夏季水および大西洋起源水から海洋熱が供給されることで冬季でも結氷が抑制される顕熱ポリニヤとしての特徴も指摘されている。

バロー沿岸域での係留系および衛星データによって BCP 形成が捉えられている 2009 年秋季から 2010 年春季までを対象とした季節変動実験を実施し、観測的知見の検証を行った。モデル結果からも北東風強化・水温上昇・海水生成量低下がほぼ同時期に捉えられており、上記のプロセスを支持していた。さらにカナダ海盆の中深層に位置する大西洋起源水の挙動を可視化するために、北極海盆域の 200m 以深に撒いた仮想トレーサーの拡がり調べたところ、BCP 形成時には強い北東風に伴ってバロー峡谷を水深の浅い方に遡る "up-canyon flow" が生じ、さらに鉛直拡散が加わることで仮想トレーサーが海面付近まで達する様子が確認された (図 3)。

これらの解析結果から、BCP は形成時に暖水塊からの熱供給によって海水生産が抑制されるプロセスを伴い、潜熱・顕熱ポリニヤ双方の特徴を併せ持つ「ハイブリッド」ポリニヤであることが明らかとなった。このハイブリッド特性によって固有の水塊形成が生じている可能性もあり、本成果は北極海全域の水塊構造を考える上でも重要である。

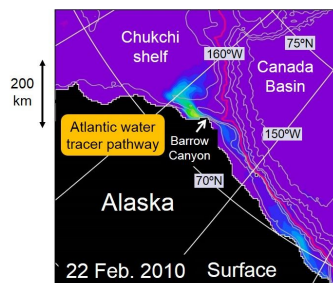


図3 季節変動実験で計算されたバロー沿岸ポリニヤ形成時期における大西洋トレーサーの海面での分布。

(3) 冬季海水下の亜表層熱輸送

2001 年から 2014 年までの年々変動実験の結果を解析し、亜表層水温極大の年々変動とそのメカニズムについて調べた [Deep Sea Research Part I にて査読中]。まず太平洋夏季水の主要な輸送経路上に位置し、長期に渡る観測データが得られているバロー峡谷で比較検証を行い、本実験結果がバロー峡谷における海水密接度および通過流量を非常に良く再現していることを確認した。

海洋研究開発機構が 2010 年 9 月から 2014 年 9 月まで 4 年間係留系を設置していたチャクチ深海平原では、冬季海水下の亜表層において水温上昇が毎年観測されており、年々変動実験でもそのような季節性が再現された。この水温上昇はエクマン昇降や乱流混合のタイミングとも一致しないので、鉛直一次元プロセスでは説明できず、陸棚起源の暖水輸送が冬季海水下の昇温に寄与していることが示唆された。

次に海洋亜表層で鉛直積算した貯熱量を確認すると、各年冬季にはカナダ海盆南部に暖水塊が分布していた。北緯 75 度に沿った東西方向の鉛直断面図では水深 50–100m に 0°C 近い亜表層水温極大が生じている (図 4)。この暖水域はベーリング海峡に撒いた仮想トレーサーの拡がりとも良く一致していることから、温暖な太平洋夏季水が冬季海水下に多くの熱を供給していることが示唆された。

熱輸送経路をより具体的に特定するために西経 160 度を横切る東西方向の海洋熱輸送量を計算すると、ノースウィンド海嶺南端 (北緯 73 度付近) の亜表層において西向きシグナルが卓越していた。亜表層の水平流速場を確認すると、冬季にチャクチ陸棚北縁で西向きジェットが卓越しており、この強い海流が太平洋起源の暖水を運んでいた (図 5)。

亜表層ジェットが強さは局所的な風系やカナダ海盆を時計周りに流れるポーフォート循環だけでは説明できず、北極海で広範囲に生じる境界流 (boundary current) の一部と見なすことができる。また夏季の海水融解が活発であるほど、成層強化を介して亜表層の熱輸送が維持されやすいことも示唆された。

即ち、北極海チャクチ海台周辺域の冬季海水下で観測された亜表層の水温上昇に対しては、温暖な太平洋夏季水がアラスカ沿岸流およびその下流域で生じる西向き陸棚縁ジェットによって輸送される過程が重要であることが明らかとなった。

本課題によって、カナダ海盆域を時計周りに流れるポーフォート循環とは別に、陸棚縁に沿った強いジェット流も主要な暖水経路の一部として指摘できたことは、今後海洋熱が海水変動に及ぼす影響を調べていく上でも有用な情報となる。

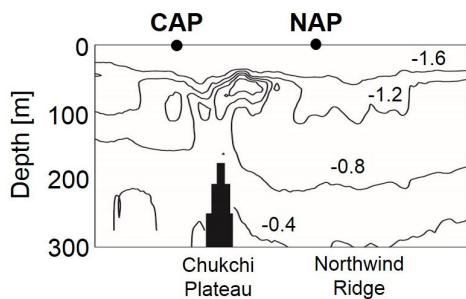


図4 チャクチ深海平原 (CAP) とノースウインド深海平原 (NAP) を横切る北緯75度に沿った東西断面における鉛直水温分布 [°C]。

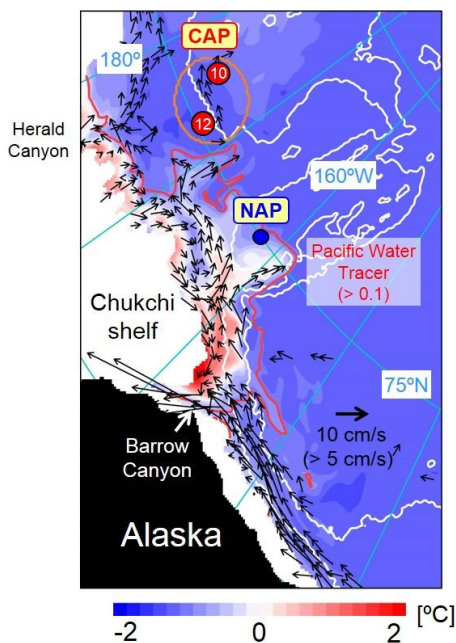


図5 水深60–100mで平均した海水温 [°C] と水平流速場 (秒速5cmより速いベクトルのみ表示)。白いコンターは1000mと3000mの等深線、赤いコンターは太平洋水トレーサーの縁 (濃度0.1で定義) を表す。

(4) 今後の展望

海盆域の亜表層に蓄積された海洋熱が解放されるためには、強い湧昇流や鉛直混合が必要であるが、これに関する明瞭なイベントはまだ報告されていない。近年の海水減少はむしろ融解水の供給などを介して密度成層を強化する方向に働いていることも指摘されており (負のフィードバック) [引用文献]、海水減少メカニズムにおける亜表層水温極大の位置付けについてはさらなる検証が必要である。

また本課題で得られた水塊輸送に関する知見は栄養塩の再分配などを介して海洋生態系の変動とも密接な関係がある。チャクチ深海平原に設置した係留系ではセディメントトラップによる生物由来粒子の観測もっており、今後は生態系モデルと組み合わせることなどにより、物理的側面と生物地球化学的側面の両方から変動メカニズムを明らかにしていく予定である。そのような周辺分野への波及効果も含めて、これからも継続的に進める高解像度海水海洋結合モデリング研究の基盤を整備することができた。

<引用文献>

Timmermans, M.-L. et al. (2014), *J. Geophys. Res.*, doi:10.1002/2014JC010273.

Hasumi, H. (2006), Center for Climate System Research Report, Univ. of Tokyo, 25, 103pp.

Toole, J. M. (2010), *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2009JC005660.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

Mizobata, K., E. Watanabe, and N. Kimura, Wintertime variability of the Beaufort Gyre in the Arctic Ocean derived from CryoSat-2/SIRAL observations, *Journal of Geophysical Research* (査読有) 121, 2016, 1685–1699, doi:10.1002/2015JC011218.

Hirano, D., Y. Fukamachi, E. Watanabe, K. I. Ohshima, K. Iwamoto, A. R. Mahoney, H. Eicken, D. Simizu, and T. Tamura, A wind-driven, hybrid latent and sensible heat coastal polynya off Barrow, Alaska, *Journal of Geophysical Research* (査読有) 121, 2016, 980–997, doi:10.1002/2015JC011318.

Watanabe, E., J. Onodera, N. Harada, M. N. Aita, A. Ishida, and M. J. Kishi, Wind-driven interannual variability of sea ice algal production in the western Arctic Chukchi Borderland, *Biogeosciences* (査読有) 12, 2015, 6147–6168, doi:10.5194/bg-12-6147-2015.

[学会発表](計 24 件)

Watanabe, E., J. Onodera, M. Itoh, S. Nishino, and T. Kikuchi, Wind-driven variability in subsurface warm layers of the Chukchi shelf break, ArcticNet Annual Science Meeting, 2016 年 12 月 7 日, 「ウイニペグ(カナダ)」.

Watanabe, E., Winter ocean heat transport driven by subsurface shelf-break jet north of Chukchi Sea, Forum for Arctic Modeling and Observational Synthesis (FAMOS) Workshop, 2016 年 11 月 3 日, 「ウッズホール(米国)」.

渡邊 英嗣, 小野寺 丈尚太郎, 伊東素代, 西野 茂人, 菊地 隆, 北極海チャクチ陸棚縁における冬季海氷下の亜表層暖水輸送, 日本海洋学会 2016 年度秋季大会, 2016 年 9 月 14 日, 「鹿児島大学(鹿児島県鹿児島市)」.

渡邊 英嗣, 小野寺 丈尚太郎, 伊東素代, 西野 茂人, 菊地 隆, 西部北極海における厳冬期の亜表層暖水輸送, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016 年 5 月 26 日, 「幕張メッセ(千葉県千葉市)」.

平野 大輔, 深町 康, 渡邊 英嗣, 岩本 勉之, 大島 慶一郎, 田村 岳史, アラスカ沖パロー沿岸ポリニヤにおける海氷生産量の経年変動, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016 年 5 月 26 日, 「幕張メッセ(千葉県千葉市)」.

溝端 浩平, 渡邊 英嗣, 木村 詞明, Wintertime variability of the Beaufort Gyre in the Arctic Ocean derived from CryoSat-2/SIRAL measurements, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 2016 年 5 月 26 日, 「幕張メッセ(千葉県千葉市)」.

渡邊 英嗣, 小野寺 丈尚太郎, 伊東素代, 西野 茂人, 菊地 隆, 北極海チャクチ海台における亜表層水温極大の年々変動メカニズム, 日本海洋学会 2016 年度春季大会, 2016 年 3 月 15 日, 「東京大学(東京都文京区)」.

Watanabe, E., J. Onodera, M. Itoh, S. Nishino, and T. Kikuchi, Overwinter transport of subsurface warm water toward the Arctic Chukchi Borderland, Ecosystem Study for Sub-Arctic and Arctic Seas (ESSAS) Annual Meeting, 2016 年 3 月 7 日, 「横浜ワールドポーターズ(神奈川県横浜市)」.

Watanabe, E., J. Onodera, S. Nishino, and T. Kikuchi, Overwinter transport of subsurface warm water around the Arctic Chukchi Borderland, Ocean Sciences Meeting 2016, 2016 年 2 月 22 日, 「ニューオーリンズ(米国)」.

渡邊 英嗣, 西部北極海における亜表層水温極大モデリング, 北海道大学低温科学研究所共同利用研究集会, 2015 年 12 月 10 日, 「北海道大学(北海道札幌市)」.

Watanabe, E., Subsurface warm water layer in the western Arctic Chukchi Abyssal Plain, Forum for Arctic Modeling and Observational Synthesis (FAMOS) Workshop, 2015 年 11 月 5 日, 「ハイアニス(米国)」.

渡邊 英嗣, 小野寺 丈尚太郎, 西野 茂人, 菊地 隆, 北極海チャクチ深海平原の春季水温極大, 日本海洋学会 2015 年度秋季大会, 2015 年 9 月 28 日, 「愛媛大学(愛媛県松山市)」.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡邊 英嗣 (WATANABE, Eiji)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・
北極環境変動総合研究センター・研究員
研究者番号: 5 0 7 2 2 5 5 0